

УДК 621.391

ЧАСТОТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОДОСТУПА

БОРЦОВА Л.М.

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

FREQUENCY EFFICIENCY OF METHODS OF SIGNAL FORMING IN A NEW RADIO ACCESS SYSTEMS

BORSCHOVA L.M.

National Academy of Telecommunication n.a. O.S. Popov

Аннотация. В статье рассмотрены методы формирования сигналов в современных системах беспроводного радиодоступа. Проведен анализ частотной эффективности систем радиосвязи.

Annotation. In the article methods of signal forming in wireless radiosystems considered. The frequency efficiency of radio communication systems analyzed.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высокий интерес к системам радиодоступа связан с возможностью решения задачи обеспечения услугами связи на участке между абонентским и коммутационным оборудованием. Для успешной конкуренции радиотехнологий с проводными средствами связи кроме удобства необходимо повышение эффективности использования доступных ресурсов в сети, что является важной проблемой.

Системы радиодоступа отличаются значительным многообразием характеристик каналов и условий распространения радиосигналов. Радиоканалы можно разделить на следующие классы: без замираний /с замираниями, однолучевые /многолучевые, без прямой видимости /прямой видимости. Для систем радиодоступа характерно многолучевое распространение радиоволн, вследствие наличия отражений от различных препятствий [1–5].

Часто основным показателем качества функционирования систем радиодоступа выступает устойчивость к внешним помехам, в том числе к замираниям и межсимвольной интерференции, которые вызваны многолучевым распространением сигналов. Такая устойчивость определяется способами обработки сигналов, выбором параметров модуляции, кодирования, синхронизации, протоколов доступа к каналу. С другой стороны, эти параметры существенно влияют на частотную эффективность системы радиосвязи.

Целью работы является анализ частотной эффективности современных систем радиодоступа с учетом методов формирования радиосигналов.

Для оценки эффективности систем связи используется коэффициент частотной эффективности [2]

$$\gamma = \frac{R}{\Delta F}, \quad (1)$$

где R – скорость передачи информации; ΔF – ширина полосы частот, занимаемая сигналом. Рассмотрим методы формирования и обработки сигналов, используемые в системах широкополосного беспроводного доступа.

В каналах с замираниями находят широкое применение сигналы с расширенным спектром и сигналы с ортогональной частотной модуляцией (OFDM). Следует отметить, что сигналы с расширенным спектром занимают значительно большую полосу, чем требуется

для передачи простыми сигналами. Применение OFDM-сигналов не приводит к увеличению требуемой полосы частот.

В случае расширения спектра с изменением частоты по псевдослучайному закону (FHSS) для формирования сигнала используется $L=2^k$ несущих частот $k = 1, 2, \dots$. Длительность передачи на одной частоте T_f при медленной FHSS кратна длительности символа информационной последовательности T_c

$$T_f = nT_c.$$

При быстрой FHSS за длительность одного информационного символа происходит смена нескольких частот длительностью T_f . Таким образом, частота постоянна в течении времени T_f и изменяется скачком от интервала к интервалу. Изменение частоты в сигналах FHSS происходит с разрывом фазы, что упрощает реализацию оборудования передачи и приема. Сигналы с расширенным спектром, использующие M-ичную фазовую модуляцию в соответствии с псевдослучайной последовательностью (DSSS) могут быть заданы в виде [1]

$$u_s(t) = A \sum_{i=1}^N e^{j(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_0)} \text{rect}_{T_0}(t - iT_0),$$

где A – амплитуда сигнала; φ_i – значение фазы i -го сигнала в последовательности длиной N ; φ_0 – начальная фаза, функция $\text{rect}_{T_0}(t - iT_0)$ задает временное окно существования сигнала. Наиболее распространена двоичная модуляция BPSK, находят применение и многопозиционные сигналы.

При OFDM модуляции полоса частот канала ΔF разделяется на N частотных подканалов, в каждом из которых осуществляется модуляция ортогональных поднесущих последовательностью данных. Поэтому полоса занимаемых частот каждым из $N=2^k$ подканалов, где k – натуральное число:

$$\Delta F_k = \frac{\Delta F}{N}.$$

Длительность символа также увеличивается в N раз. При многолучевом распространении замирания обусловлены разностью хода лучей и суммированием сигналов в точке приема с разными фазами

$$\Delta \varphi_i = \Delta F \Delta \tau = \Delta F (\tau_{pi} - \tau_p), \quad (2)$$

где τ_{pi} – время распространения в i -м луче; τ_p – время распространения сигнала в направлении прямой видимости. Из (2) следует, что чем меньше полоса частот канала, тем меньше разность фаз $\Delta \varphi_i$. Для отдельного подканала OFDM сигнала $\Delta \varphi_{ik} = \frac{\Delta F}{N} \Delta \tau$. Число подканалов определяется исходя из максимальной наблюдаемой разности хода лучей и допустимой разности фаз в подканале между лучами. Допустимая разность фаз не превышает $3 \dots 5^\circ$.

В общем случае выражение для OFDM сигнала следующее [1]:

$$u_s(t) = Ae^{j2\pi f_0 t} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N c_{lk} e^{j\frac{2\pi f}{T_0}(t-T_{\text{зи}}-lT_c)}$$

где c_{lk} – символ данных в кадре, на k -й поднесущей в составе l -го символа OFDM сигнала; l – номер символа OFDM сигнала; k – номер поднесущей; $T_{\text{зи}}$ – длительность защитного интервала; T_c – длительность OFDM сигнала; T_0 – длительность символа в составе OFDM сигнала.

ЧАСТОТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРСОНАЛЬНЫХ СЕТЕЙ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

Внутри помещений возможна организация информационного пространства, где все устройства включены в единую сеть. Для реализации таких проектов используются технологии персональных сетей радиодоступа. Методы передачи и модуляции, соответствующие рассматриваемым стандартам, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные характеристики персональных сетей беспроводного доступа

| Стандарт | Рабочий диапазон частот, МГц | Скорость передачи данных, Мбит/с | Полоса пропускания канала, МГц | Метод передачи, модуляции |
|---------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|---|
| Home RF | 2400 – 2483,5 [3] | 0,8, 1,6, 5, 10 [4] | 1; 2,5; 5 [4] | FHSS, 2-FSK, 4-FSK [4] |
| Bluetooth (IEEE 802.15.1) | 2400,8–2483,5 [5] | 0,7232/0,0576 0,4339/0,4339 2, 3 [5] | 1 [5] | FHSS, GFSK, DQPSK, 8-DPSK [5] |
| IEEE 802.15.3 | 2400,8–2483,5 [5] | 11, 22, 33, 44, 55 [5] | 20 | QPSK, DQPSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM [5] |
| IEEE 802.15.3a | 3100 – 10600 [5] | 53.3, 80, 106.7, 160, 200, 320, 400, 480 [7] | 528[5] | MB-OFDM, QPSK, DCM [7]. |
| | 3100 – 4850 6900 – 9700 [5] | 28, 55, 110, 220, 500, 660, 1000, 1320 [5] | 39 78 [5] | DS-UWB, BPSK, 4BOK [5] |
| IEEE 802.15.4 | 868 – 868,6 (Е) | 0,02 | 0,6 | DSSS, BPSK |
| | 902 – 928 (США) | 0,04 | 2 | DSSS, BPSK |
| | 2400,8–2483,5 [6] | 0,25 | 5 | DSSS, O-QPSK [6] |

Устройства технологии HomeRF работают в полосе частот 2,4 ГГц с использованием метода FHSS. Скорость изменения частоты от 50 до 100 раз/с. Применение двух и четырехпозиционной частотной модуляции (2-FSK, 4-FSK) и ширины канала 1 и 5 МГц [4] позволяет изменять скорость передачи данных от 0,8 до 10 Мбит/с.

В системах стандарта Bluetooth также применяется метод FHSS. Диапазон рабочих частот делится на 79 физических каналов шириной 1 МГц. Перестройка частоты происходит путем изменения частоты несущей канала в соответствии с задаваемой в стандарте псевдослучайной последовательностью. Устройства одной пикосети используют общую псевдослучайную последовательность перестройки частоты. Скорость изменения частоты 1600 раз/с. Длительность передачи сигнала на одной частоте кратна 0,625 мс. Каждый пакет данных независимо от его длины передается на одной частоте, а переход в следующем временном окне (0,625 мс) происходит на частоту, соответствующую частоте, если бы передача велась в каждом окне в соответствии с заданной последовательностью [1], что способствует сосуществованию нескольких сетей.

Спецификация физического канала IEEE 802.15.3 предусматривает 5 допустимых скоростей передачи данных и соответственно 5 типов модуляции QPSK, DQPSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM. Скорость 22 Мбит/с является обязательной для поддержки устройствами

IEEE 802.15.3. При работе на этой скорости данные не кодируются. В остальных случаях перед формированием канальных символов применяется сверточное кодирование [5]. Устройства стандарта IEEE 802.15.3 предполагают совместимость с сетью стандарта IEEE 802.11b или по выбору производителя с другими беспроводными стандартами IEEE 802 [9].

Организация сверхширокополосной передачи в сетях IEEE 802.15.3a возможна в двух вариантах: мультиполосный множественный доступ посредством ортогональных несущих (MB-OFDM) и расширение спектра методом прямой последовательности (DS-UWB). Сущность MB-OFDM состоит в том, что весь диапазон делится на полосы по 528 МГц. Каждая полоса делится на 128 поднесущих частот, из них используется 122: 100 – для модуляции данными, 12 – пилотных, 10 – защитных. Каждая поднесущая модулируется посредством QPSK для скорости передачи данных < 200 Мбит/с или DCM (Dual-Carrier Modulation) для скорости передачи данных >200 Мбит/с. Применяется сверточное кодирование со скоростями кода 1/3, 1/2, 5/8, 3/4. Мультиполосность означает, что последующий символ может передаваться в другой частотной полосе согласно схеме логического канала. Предусмотрено 49 логических каналов, номер канала определяется синхропоследовательностью в преамбуле пакета данных [7]. Таким образом реализуется комбинация OFDM и механизма частотных скачков.

Технология DS-UWB предполагает замену каждого бита на кодовую последовательность длиной до 24 бит. Предусмотрено два вида модуляции – двоичная фазовая BPSK и вариант квадратурной 4BOK (4-ary bi-orthogonal keying) [5].

Стандарт IEEE 802.15.4 содержит два варианта организации физического уровня, которые основываются на методе модуляции с прямым расширением спектра DSSS. Модуляция и расширяющие последовательности различны в диапазонах 868/915 МГц и 2,4 ГГц [5].

В диапазоне 2,4 ГГц данные разбиваются на блоки из 4 бит. Каждый блок заменяется одной из 16 квазиортогональных последовательностей длительностью 32 символа. Метод модуляции – QPSK. Четные символы квазиортогональной последовательности (начиная с нулевого) модулируют синфазный канал (I), нечетные – квадратурный (Q) канал. В результате последовательность в квадратурном канале смещена относительно синфазного на период одного символа, поэтому модуляция называется Offset-QPSK. Длительность символа после квадратурного модулятора вдвое больше длительности символа последовательности [5].

В диапазонах 868 и 915 МГц данные подвергаются разностному кодированию. Далее производится замена каждого бита расширяющей последовательностью из 15 символов. Преобразованный поток данных передается в радиоканал посредством BPSK [5].

Вспользуемся выражением (1) для определения показателя эффективности персональных сетей беспроводного доступа, результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчета частотной эффективности персональных сетей беспроводного доступа

| Стандарт | Home RF | | | | Bluetooth (IEEE 802.15.1) | IEEE 802.15.3 | IEEE 802.15.3a | | | | IEEE 802.15.4 | | |
|--|---------|-----|---|----|------------------------------|-----------------|----------------|------|------|------|---------------|------|------|
| | 0,8 | 1,6 | 5 | 10 | | | 53,3 | 480 | 28 | 1320 | 0,02 | 0,04 | 0,25 |
| Скорость передачи данных, Мбит/с | | | | | от 0,0576 до 0,7232 | от 11 до 55 | | | | | | | |
| Полоса пропускания канала, МГц | 1 | 1 | 5 | 5 | 1 | 20 | 528 | | 39 | 702 | 0,6 | 2 | 5 |
| Частотная эффективность системы передачи | 0,8 | 1,6 | 1 | 2 | от 0,058 до 0,7232 | от 0,55 до 2,75 | 0,1 | 0,91 | 0,72 | 1,88 | 0,033 | 0,02 | 0,05 |

Высокая частотная эффективность стандарта IEEE 802.15.3 по сравнению с другими стандартами персональных сетей объясняется использованием многопозиционного метода модуляции (64-QAM) и отказом от сигналов с расширенным спектром. В Home RF сочетаются расширение спектра с изменением частоты по псевдослучайному закону и 4-FSK. Наименьшую частотную эффективность обеспечивает IEEE 802.15.4 с расширением спектра прямой последовательностью (DSSS), которая предусматривает расширение спектра сигнала в 15 раз.

ЧАСТОТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

Организация сети в зоне с радиусом 100 м возможна с использованием систем локального широкополосного радиодоступа. Основные характеристики рассматриваемых стандартов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики локальных сетей беспроводного доступа

| Стандарт | Рабочий диапазон частот, МГц | Скорость передачи данных, Мбит/с | Полоса пропускания канала, МГц | Метод передачи, модуляции |
|--------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--|
| IEEE 802.11 | 2400 – 2483,5 [1] | 1, 2 | 1,5 [1] 20 | FHSS, GFSK, 4GFSK, DSSS, BPSK, QPSK [1] |
| IEEE 802.11b | 2400,8–2483,5 [1] | 1, 2, 11 (22, 33) | 20 | DSSS, DBPSK CCK, (PBCC), DQPSK |
| IEEE 802.11a | 5150 – 5350 5670 – 5850 [1] | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 | 20 | OFDM, BPSK, QPSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM [6] |
| IEEE 802.11g | 2400,8–2483,5 [8] | 1 – 54 | 20 | DSSS, , CCK, PBCC, OFDM, QPSK [8] |
| IEEE 802.11n | 5150 – 5350 5670 – 5850 [1] | 6,5 – 72,2 | 20, 40 | OFDM, BPSK, QPSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM [8] |
| Hiper LAN2 | 5150 – 5350 5670 – 5850 [1] | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 | 20 | OFDM, BPSK, QPSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM [1] |

Физический уровень стандарта IEEE 802.11 может быть реализован в двух вариантах: с использованием сигналов с прямым расширением спектра (DSSS) и сигналов с псевдослучайной перестройкой частоты (FHSS). При использовании сигналов DSSS каждый информационный символ заменяется прямой (передача 1) или инверсной (передача 0) 11-элементной последовательностью кода Баркера. Применение последовательностей Баркера позволяет на приемной стороне при обработке сигнала получить энергетический выигрыш, пропорциональный значению базы B : $B = T_c/\tau_0 = 11$. Для получения энергетического выигрыша требуется высокая точность синхронизации по времени и частоте. Используемые методы модуляции – DBPSK, DQPSK для скорости передачи данных 1 и 2 Мбит/с соответственно. Для передачи информации на физическом уровне с помощью FHSS применяются сигналы GFSK, 4GFSK. Смена несущей частоты в соответствии с псевдослучайным алгоритмом происходит в среднем 2,5 раз/с. Перестройка частоты позволяет избежать длительных помех со стороны других станций. Применение сигналов GFSK обеспечивает возможность некогерентного приема [1].

Спецификации IEEE 802.11b обеспечивают скорости передачи до 5,5 и 11 Мбит/с благодаря применению методов комплиментарного кодирования. Каждый символ может быть передан с использованием DQPSK.

В IEEE 802.11a, g и Hiper LAN2 возможна реализация скорости передачи данных до 54 Мбит/с за счет применения ортогональной частотной модуляции (OFDM). Принципы формирования сигналов, основные параметры оборудования стандартов IEEE 802.11g и IEEE

802.11a совпадают за исключением диапазона рабочих частот. При формировании OFDM сигнала используется 52 поднесущих, четыре из которых применяются для передачи пилот-сигналов, необходимых для обеспечения когерентного приема и повышения устойчивости к фазовому шуму. Для передачи информации используется 48 поднесущих. Полоса частот на одну поднесущую составляет 0,3125 МГц. В соответствии с требуемой скоростью передачи данных выбирается один из методов модуляции: BPSK, QPSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM. Для поднесущих пилот-сигналов используется BPSK. Для повышения помехоустойчивости в стандартах имеет место сверточное кодирование со скоростями 1/2, 2/3, 3/4 [1].

Стандарт IEEE 802.11n основан на IEEE 802.11a. Увеличение скорости передачи данных возможно за счет удвоения полосы пропускания канала с 20 до 40 МГц и введения дополнительных антенных каналов приема-передачи [8].

Определим частотную эффективность рассматриваемых систем радиодоступа, воспользовавшись (1), результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты расчета частотной эффективности локальных сетей беспроводного доступа

| Стандарт | Скорость передачи данных, Мбит/с | Полоса пропускания канала, МГц | Частотная эффективность системы передачи |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------|--|
| IEEE 802.11 | 1 | 20 | 0,05 |
| | 2 | | 0,1 |
| | 1 | 1,5 | 0,66 |
| | 2 | | 1,33 |
| IEEE 802.11b | от 1 до 33 | 20 | от 0,05 до 1,65 |
| IEEE 802.11a | от 6 до 54 | 20 | от 0,3 до 2,7 |
| IEEE 802.11g | от 1 до 54 | 20 | от 0,05 до 2,7 |
| IEEE 802.11n | от 6,5 до 72,2 | 20 | от 0,33 до 3,61 |
| Hyper LAN2 | от 6 до 54 | 20 | от 0,3 до 2,7 |

Высокой эффективностью с точки зрения использования выделенной ширины канала обладают IEEE 802.11b / a / n и Hyper LAN2, это объясняется применением ортогональной частотной модуляции, многопозиционных методов модуляции и высоких скоростей кода. Наилучшей частотной эффективностью обладает IEEE 802.11n благодаря увеличению числа поднесущих в канале 20 МГц с 52 до 56 (52 поднесущие используются для передачи информации); повышению допустимой скорости кода до 5/6 и возможному сокращению длительности защитного интервала OFDM символа.

ЧАСТОТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕТЕЙ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

В таблице 5 приведены основные характеристики и параметры, определяющие работу оборудования стандартов региональных сетей беспроводного доступа.

Стандарт IEEE 802.16 содержит принципы построения систем широкополосного беспроводного доступа в диапазоне частот 10 – 66 ГГц. Радиосвязь в этом диапазоне возможна в случае прямой видимости, поэтому используется только непосредственная модуляция несущей (режим с одной несущей – WMAN-SC). В зависимости от удаленности абонентских станций поддерживается адаптивный выбор вида модуляции и способов кодирования.

Таблица 5 – Основные характеристики региональных сетей беспроводного доступа

| | Рабочий диапазон частот, ГГц | Скорость передачи данных, Мбит/с | Полоса пропускания канала, МГц | Метод передачи, модуляции |
|--------------|---|--|---|---|
| IEEE 802.16 | 10 – 66 | 32, 64, 96 40, 80, 120 44,8, 89,6, 134,4 [8] | 20 (США) 25 (США) 28 (Е) | WMAN-SC, QPSK, 16-QAM, 64-QAM [1] |
| IEEE 802.16a | 2 – 11 | для 3 МГц от 2,06 до 11,2 [1, стр 151] (режим OFDMA) | 1,75; 3,5; 7; 14; 28 (Е) 1,25; 5; 10; 20; 25 (США) | WMAN-SCa WMAN- OFDM, WMAN- OFDMA, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM [8] |
| IEEE 802.16e | 2,4 – 2,483 3,4 – 3,6 5,7 – 5,8 [1] | Для 10 МГц 1,06/0,78 до 31,68/23,52 [8] | 1,75; 3,5; 7; 10 [1] | S-OFDMA, QPSK, 16-QAM, 64-QAM [8] |

В стандарте IEEE 802.16a предполагается работа в диапазоне 2 – 11 ГГц в трех режимах: WMAN-SCa, WMAN- OFDM и WMAN- OFDMA. Отличие WMAN-SCa от WMAN-SC состоит в возможности использования 256-QAM. В режиме WMAN-OFDM модуляция поднесущих выполняется независимо, количество поднесущих – 200 (8 из них для передачи пилот-сигналов). Скорость кода изменяется адаптивно и равна 1/2, 2/3 и 3/4. Используемые методы модуляции: BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM. Для поднесущих пилот-сигналов применяется BPSK [8]. Основное отличие режима OFDMA от OFDM проявляется в принципе разделения каналов. Один логический OFDMA-канал образован фиксированным набором несущих, распределенных по всему доступному диапазону частот. Количество поднесущих в OFDMA – 2048, соответственно число логических каналов составляет от 32 до 70, по 24 или 48 информационных поднесущих. Методы модуляции включают в себя QPSK, 16-QAM со скоростями кода 1/2 и 3/4, а также дополнительно 64-QAM со скоростями кода 1/2, 2/3 и 3/4.

Особенность IEEE 802.16e на физическом уровне заключается в изменении режима OFDMA. В дополнении IEEE 802.16e появился режим масштабируемого OFDMA, который позволяет использовать 1024, 512, 256 и 128 номинальных поднесущих [8].

Для определения частотной эффективности региональных сетей беспроводного доступа воспользуемся выражением (1), результаты расчета представлены в табл.6.

Таблица 6 – Результаты расчета частотной эффективности региональных сетей беспроводного доступа.

| Стандарт | IEEE 802.16 | IEEE 802.16a | IEEE 802.16e |
|--|------------------|-----------------|------------------|
| Скорость передачи данных, Мбит/с | от 44,8 до 134,4 | от 2,06 до 11,2 | от 0,78 до 31,68 |
| Полоса пропускания канала, МГц | 28 | 3 | 10 |
| Частотная эффективность системы передачи | от 1,6 до 4,8 | от 0,87 до 3,73 | от 0,08 до 2,35 |

Высокая частотная эффективность региональных сетей беспроводного доступа объясняется широким выбором адаптивных параметров в зависимости от качества

радиоканала. В технологии IEEE 802.16 достигаются наилучшие показатели из-за режима работы в условиях прямой видимости (WMAN-SC).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа выделены методы формирования сигналов, обеспечивающие высокую частотную эффективность современных систем радиодоступа, что позволяет оптимизировать выбор технологии для построения системы беспроводного доступа.

При определении и сравнении частотной эффективности рассматриваемых технологий не принимались во внимание размеры зоны обслуживания и максимальное количество обслуживаемых абонентов. Дальнейшими направлениями исследований могут быть анализ эффективности использования частотного ресурса (т.е. применение вышеуказанных параметров), комплексное рассмотрение частотной и энергетической эффективности систем радиодоступа и поиск методов повышения показателей эффективности беспроводных систем передачи данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. – Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.: ил.
2. Теория передачи сигналов [учебник для вузов]/ А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
3. Финогеев А.Г. Беспроводные технологии передачи данных для создания систем управления и персональной информационной поддержки./ Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению "Информационно-телекоммуникационные системы", 2008. - 51 с. Режим доступа: http://window.edu.ru/window/catalog?p_rid=56177
4. HomeRF Specification. Revision 2.01. The HomeRF Technical Committee. 1 July 2002. Режим доступа: <http://www.palowireless.com/homerf/homerfspec.asp>
5. Шахнович А.В. Современные технологии беспроводной связи / А.В. Шахнович, – Изд. 2-е. М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
6. Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович, – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
7. Digital Standard ECMA-368 IEEE 802.15.3a (Ultra Wide Band). Режим доступа: http://www2.rohde-schwarz.com/file_10808/Supplement_K264_UWB_e.pdf
8. Вишневецкий В. Энциклопедия WiMAX путь к 4G/ В. Вишневецкий, С. Портной, И. Шахнович, – М.: Техносфера, 2009. – 471 с.
9. 802.15.3 IEEE Standard for Information technology –Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Режим доступа: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.3-2003.pdf>